

# ミールワームによるプラスチックの生分解

奥園 元晴・高野 茉里奈・山本 和弥\*

Biodegradation of Plastic Resin by Mealworm.

Motoharu OKUZONO, Marina TAKANO and Kazuya YAMAMOTO\*

## Abstract

Recently, a large amount of plastic waste has become a terrible problem, and a solution has been considered. The use of biodegradation is being considered as the solution and the biodegradation of plastic waste by using the insect has been expected. *Tenebrio molitor*, called mealworm, belongs to the family *Coleoptera*, *Tenebrionidae*, and has been reported to biodegrade polystyrene and polyethylene. The purpose of this study is to search for biodegradable plastics by mealworms and to obtain basic knowledge about the plastics biodegradation of mealworms. Each of the six kinds of plastic products (polystyrene, polyurethane, high-density polyethylene, low-density polyethylene, cushioning material, PE powder) was fed to the mealworms. By the mass difference and visual observation, it was confirmed that polystyrene and the cushioning material had a large feeding activity, and that polyurethane and the LDPE were also fed. It was revealed that the shape and morphology of plastics influence the feeding activity of mealworms by electron microscopy. The plastic biodegradability of mealworms was assessed by excrement after eating the plastic using FT-IR measurements. Decomposition and oxidation of the ingested plastic were observed by FT-IR spectra of excrement, but it was suggested that if the amount of plastic taken in was large, it would be discharged without being decomposed.

**Key words:** Mealworm, Biodegradation, Plastic resin

## 1. はじめに

近年、石油を原料としたプラスチックの生産量が爆発的に増加し、それに伴って大量のプラスチック廃棄物が問題となっている。近年はリサイクル技術の向上等によって廃棄量の増加は見られないが、プラスチックごみの問題は依然として深刻だ。最近では環境中に散逸したマイクロプラスチックが問題視され、生態系に与える影響が懸念されている。このような問題が生じる原因として、多くのプラスチックが安定な物質であり、人工的に分解処理するにはエネルギーが必要となり、環境中に放たれると分解されないことが挙げられ、その解決策として生分解の利用が考えられてきた。生分解性プラスチックは環境中の微生物によって水と二酸化炭素に完全分解されるという利点があるが、一般的なプラスチックに比べ高価且つ物性が劣る等、課題は多い。その他、プラスチックを生分解する手段の一つとして、昆虫の利用が考えられる。プラスチックを消化できる昆虫はいくつか知られており、ノシメダラメイガ (*Plodia interpunctella*) の幼虫やハチノスツヅリガ (*Galleria mellonella*) の幼虫はポリエチレンを分解できることが報告されている<sup>1,2)</sup>。また、チャイロコメノゴミムシ (*Tenebrio molitor*) はポリスチレン、ポリエチレンを分解できることが報告されている<sup>1)</sup>。チャイロコメノゴミムシはコウチュウ目ゴミムシ科に属し、ヨーロッパ原産であるが貯蔵穀物の害虫として全世界に帰化している。体長は幼虫で2 cm程度、成虫で1.5 cm程度、成虫の寿命は一カ月程である。飼育が容易であるため、幼虫は「ミールワーム」という名称で小動物の餌として広く利用されてきた。ミールワームが摂食したポリスチレンは消化管内に存在する微生物によって解重合され、一部が二酸化炭素・水に分解、低分子となったポリスチレンは糞中に含まれ排

泄される。そこで本研究では、ミールワームを用いて難分解性プラスチックの処理を行い、ミールワームが生分解可能なプラスチックを探索、またその基礎的な知見を得ることを目的とする。

## 2. 実験

### 2.1 試料

ミールワームに摂食させるプラスチックとして、6種類のプラスチック製品、①発泡スチロール (PS: ポリスチレン)、②吸音ウレタン (PU: ポリウレタン)、③レジ袋 (HDPE: 高密度ポリエチレン)、④緩衝材 (PP 40%&コーンスターチ)、⑤フルーツキャップ (LDPE: 低密度ポリエチレン)、⑥粉末 PE (MDPE: 中密度ポリエチレン) を使用した。他に通常飼育で用いられているふすまも使用した。ミールワームは鳥類、小動物の飼育用生餌として市販されているものを使用した。

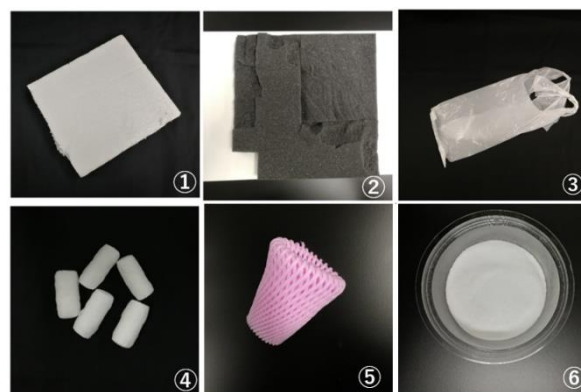


図1 今回使用したプラスチック製品

## 2.2 ミールワームのプラスチック摂食状況の確認

ミールワームのプラスチック製品の摂食状況の確認のため、以下の操作を行った。飼育容器：A-PET（非晶質ポリエチレンテレフタレート）製の上部径 78 mm、深さ 45 mm のプラスチックカップにミールワーム 10 個体と 5~10 mm 四方に切断した各プラスチック片を入れ、室温（20℃ ~25℃）の暗所にて観察した。摂食の確認は予め飼育容器全体（容器ミールワーム+プラスチック）の質量を計測し、一週間後に測定した質量との差で確認した。摂食されたプラスチックの一部は二酸化炭素と水になるため、摂食し、代謝分解が進行すれば質量は減少すると推測される。また、比較としてミールワーム 10 個体を絶食させ同条件で飼育し、一週間後の質量差を測定した。

## 2.3 コーンスターチを混合したプラスチック製品の摂食

実験 2.2 にて、コーンスターチ由来の緩衝材の摂食が特に大きく確認されたため、緩衝材と PE 粉末を除いた 4 種類のプラスチックとふすまに、コーンスターチ（CS：富士フィルム和光純薬株式会社製）を混合し、実験 2.2 と同様の実験を行った。コーンスターチの混合割合は質量比で PS：CS=1:0.2、PU：CS=1:0.9、HDPE：CS=1:0.8、LDPE：CS=1:0.8、ふすま：CS=1:0.2 であった。摂食状況の確認は、実験 2.2 と同様に一週間経過後の質量を測定により行った。

## 2.4 ミールワーム代謝物の確認

実験 2.2、2.3 にて摂食が確認できたプラスチックについて、ミールワームの体内で高分子が解重合・酸化されているか確認するため、与えたプラスチックとそれを食べたミールワームの排泄物について、フーリエ変換赤外吸収分光法（FT-IR）を用いて測定し、得られたスペクトルを比較した。また、採集した排泄物が実験開始以前に摂食した餌によるものではないことを確認するため、実験に使用するミールワームの通常飼育時の排泄物を同様に測定し、スペクトルを得た。通常飼育では餌として与えている小麦のふすま（小麦の表皮）と脱皮殻を食べていると思われる。測定に用いた排泄物は、飼育容器からミールワームのみを取り出し体表を洗浄・乾燥後、空の容器に入れて排泄させたものを採集した。これはミールワームが噛み砕いたプラスチック粉末の混入を防ぐためである。

## 2.5 測定

固形分で回収した排泄物は真空乾燥後、KBr 粉末と混合し測定用ペレットを調製した。KBr ペレット調製および測定条件は以下の通りである。使用機器：日本分光株式会社製フーリエ変換赤外分光光度計 FT/IR-4200KT、測定方式：KBr 錠剤法、プレス圧力：300~400 kg cm<sup>-2</sup>、プレス時間：30 分、測定範囲：400~4000 cm<sup>-1</sup>、分解能：4 cm<sup>-1</sup>、積算回数：32 回

また、使用したプラスチック片の微細な形状を確認するため走査型電子顕微鏡（SEM）観察を行った。SEM 観察用

試料は、真空乾燥した試料をカーボンテープで試料台に直接貼り付けて作成した。観察前に金蒸着処理を行った。SEM 観察は日本電子株式会社製 JSM-6510LA を用い、加速電圧 3~5 kV、高真空状態の条件で行った。

## 3. 実験結果・考察

### 3.1 ミールワームが摂食したプラスチック製品の確認

各プラスチック製品の摂食状況を確認するため、摂食前後における質量変化を確認した。各飼育容器全体（容器+ミールワーム+プラスチック片）の一週間後の質量減少量と絶食時のミールワームの一週間後の質量減少量、また、質量減少量を 10 匹のミールワームの質量で除したもの（ミールワーム質量あたりの質量減少量）を表 1 に示す。目視にてポリスチレン、緩衝材について大きな摂食活動を確認できた。緩衝材を与えた際の飼育容器内部の一週間後の変化を図 2 に示す。また、前述 2 種類のプラスチック製品ほどではないが、ポリウレタン(PU)、フルーツキャップ(LDPE)について摂食が確認できた。これらのプラスチックについては、緩衝材の結果と比較すると少ないが、質量減少が確認されたため、摂食しプラスチック成分の分解が進行したものと推測される。一方で摂食・排泄が全く確認できなかったレジ袋（HDPE）、PE 粉末(MDPE)についても質量減少が確認されたが、摂食が進んだプラスチック類と比べ減少量が少なかったことから、摂食が進まなかった、あるいは摂食しても成分の分解が少なかったと推測される。

表 1 摂食前後の質量変化量

試料	質量減少量 (10 <sup>-2</sup> g)	ミールワーム質量当りの 減少量(10 <sup>-1</sup> g/g)
PS	3.69	0.47
PU	4.11	0.50
HDPE	2.84	0.39
PP+CS	12.52	1.75
LDPE	3.42	0.53
MDPE	1.68	0.21
ふすま	15.54	2.40
絶食	6.35	1.05

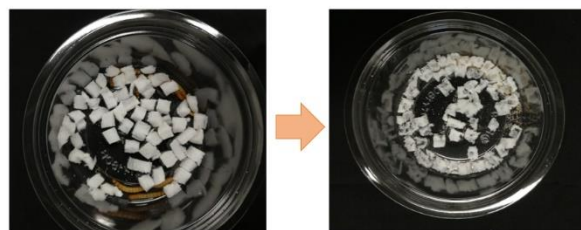


図 2 緩衝材（PP+CS）の摂食状況

### 3.2 コーンスターチを混合したプラスチック製品の摂食活動の変化

前実験よりコーンスターチを含む緩衝材の摂食活動が活発で質量減少が大きいたことが確認された。一方で、ミールワームの摂食およびプラスチックの分解には時間がかかるため、摂食活動の活性化や処理時間短縮を目的として、コーンスターチを各プラスチックと混合することで摂食活動が活発になるかどうか確認を行った。各飼育容器全体の一週間後の質量減少量と絶食時のミールワームの一週間後の質量減少量、また、質量減少量を 10 匹のミールワームの質量で除したもの（固体質量あたりの質量減少量）を表 2 に示す。

表 2 摂食前後の質量変化量（CS 混合）

試料	質量減少量 ( $10^{-2}$ g)	ミールワーム質量当りの 減少量( $10^{-1}$ g/g)
PS	6.23	0.94
PU	8.02	1.02
HDPE	5.93	0.73
LDPE	6.48	1.01
ふすま	5.14	0.66

目視にてポリスチレン、ポリウレタン、フルーツキャップ（LDPE）について大きな摂食活動を確認できた。フルーツキャップを与えた際の飼育容器内部の一週間後の変化を図 3 に示す。前項の実験と比較するとほぼ全てのプラスチック製品において、視認出来るほど分かりやすく摂食活動が活発化していた。しかし、唯一レジ袋（HDPE）では活発な摂食活動を確認できなかった。表 2 より表 1 の結果と比べてミールワーム質量当たりの質量減少が増加した。混合したコーンスターチの摂食とともに、プラスチック片も摂食したため、質量減少が増加したと考えられる。

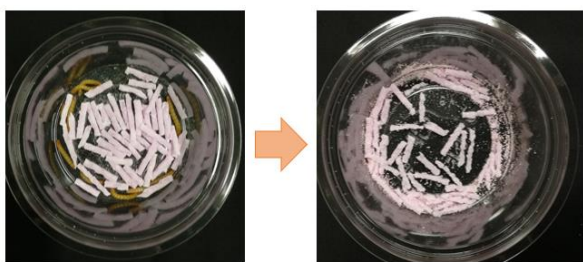


図 3 コーンスターチを混合した LDPE の摂食状況

### 3.3 プラスチック製品の表面形状の観察

結果 3.1 および 3.2 から、摂食を視認できた発泡スチロール（PS）、吸音ウレタン（PU）、フルーツキャップ（LDPE）はいずれも多孔質のプラスチック製品である。また、同じポリエチレンでも多孔質であるフルーツキャップは摂食したが、フィルム状であるレジ袋（HDPE）と、粉末状の PE 粉末（MDPE）は摂食が確認できなかった。プラスチックの種類によって摂食状況が異なるのはプラスチックの形状、強度など、特徴によってミールワームが餌の選りすぐりを

していると考えられる。そこで、電子顕微鏡を用いてプラスチックの形状を観察し、プラスチック表面の形状がミールワームの摂食活動に及ぼす影響を検討した。

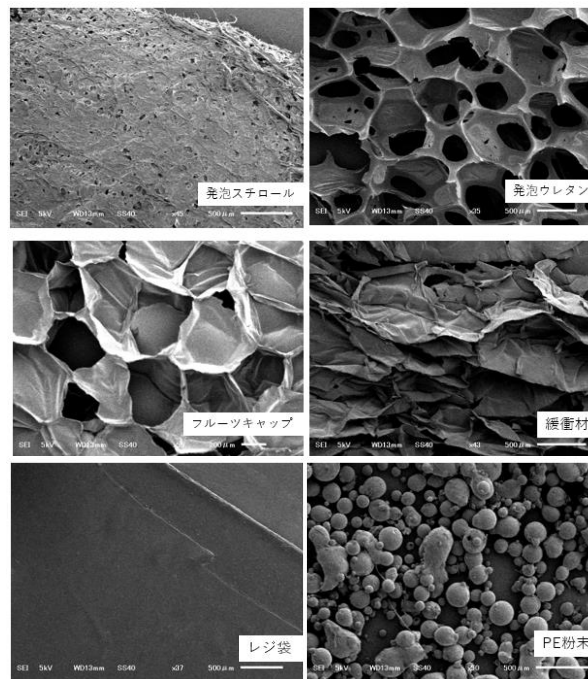


図 4 各プラスチックの電子顕微鏡観察像

図 4 は各プラスチック材の電子顕微鏡観察像である。摂食が活発に確認された 4 種類のプラスチック（発泡スチロール、吸音ウレタン、フルーツキャップ、緩衝材）は共通する特徴として、多孔質で薄い板状であることがあげられる。この特徴によりミールワームが噛むことができ、摂食を進めることができたと推測される。しかし、摂食が確認されなかった 2 種類のプラスチックは、レジ袋はフィルム状平滑な形状で穴・細孔が無く、PE 粉末は粒子状であるが 1 つ 1 つの粒子のサイズが大きいことがあげられる。ミールワームが上手く噛めず摂食できなかったと推測される。プラスチックの種類（構成モノマー）によりミールワームの摂食に違いがでるかは現在のところ明らかにできていないが、形状については、ミールワームが噛める形状であることが摂食には必要と考えられる。

### 3.4 摂食したプラスチックの代謝分解の評価

摂食されたプラスチックがミールワームの体内で解重合・酸化されているか確かめるために、与えたプラスチックとそれを摂食したミールワームの排泄物を FT-IR を用いて測定し、得られたスペクトルを比較した。

図 5 に発泡スチロール（PS）とそれを摂食したミールワームの排泄物、およびコーンスターチと混合して PS を与えた際の排泄物の FT-IR スペクトルを示す。



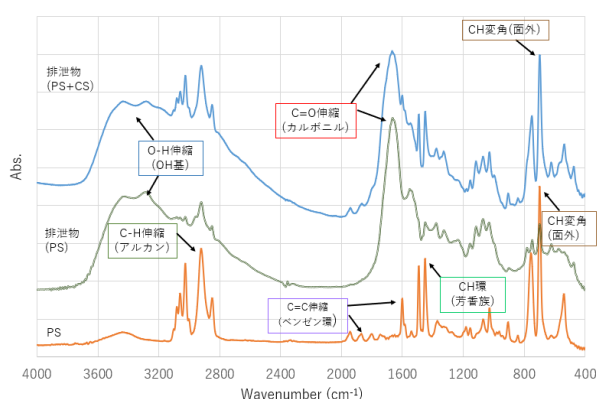


図 5 PS と各排泄物の FT-IR スペクトル

ポリスチレンのスペクトルから特徴的なベンゼン環の C-H 変角振動 ( $695\text{ cm}^{-1}$  付近) や伸縮振動 ( $1500\text{ cm}^{-1}$  付近) の吸収ピークが確認できる<sup>3)</sup>。一方、排泄物のスペクトルからカルボニル基 ( $\text{C}=\text{O}$  伸縮振動  $1700\text{ cm}^{-1}$  付近) やヒドロキシ基 ( $\text{O}-\text{H}$  伸縮振動  $3300\text{ cm}^{-1}$  付近) 由来の吸収が顕著であり、ポリスチレンに特徴的な吸収は消失、および減少が確認された。これはポリスチレンがミールワーム体内で消化され、ポリスチレンが解重合・酸化されていると推測される。また PS+CS 混合物由来の排泄物の FT-IR スペクトルから、カルボニル基やヒドロキシ基由来の吸収が認められ、酸化の進行が確認できる一方で、C-H 変角振動やアルキル基の C-H 伸縮振動の吸収が確認されたことから、コーンスターチと同時に摂食した場合も PS はミールワーム体内で消化され解重合・酸化されるが、一部は消化されずに排泄されたと推測される。コーンスターチと混合することで、時間当たりの摂食量は増加したか消化速度が追い付かなかった可能性が示唆された。

図 6 はフルーツキャップ (LDPE) とそれを摂食したミールワームの排泄物、およびコーンスターチと混合して LDPE を与えた際の排泄物の FT-IR スペクトルを示す。LDPE のスペクトルから特徴的なアルカンの C-H 伸縮振動 ( $2800\sim 2900\text{ cm}^{-1}$ ) や C-H 変角振動 ( $1450\text{ cm}^{-1}$  付近) の吸収ピークが確認できる<sup>4)</sup>。排泄物のスペクトルからはポリスチレンの結果と同様にカルボニル基 ( $\text{C}=\text{O}$  伸縮振動  $1700\text{ cm}^{-1}$  付近) やヒドロキシ基 ( $\text{O}-\text{H}$  伸縮振動  $3300\text{ cm}^{-1}$  付近) 由来の吸収が顕著であり、低密度ポリエチレンに特徴的な吸収は認められなかった。これは低密度ポリエチレンがミールワーム体内で消化され、解重合・酸化されていると推測される。また LDPE+CS 混合物を与えた排泄物の FT-IR スペクトルから、カルボニル基やヒドロキシ基由来の吸収が認められ、酸化の進行が確認できる一方で、PE 由来と推測される C-H 変角振動やアルキル基の C-H 伸縮振動の吸収が確認されたことから、PS の結果と同様にミールワーム体内で消化され解重合・酸化されるが、一部は消化されずに排泄されたと推測される。この結果もコーンスターチと同時に食することでプラスチックの消化速度が追い付かなかったと推測される。

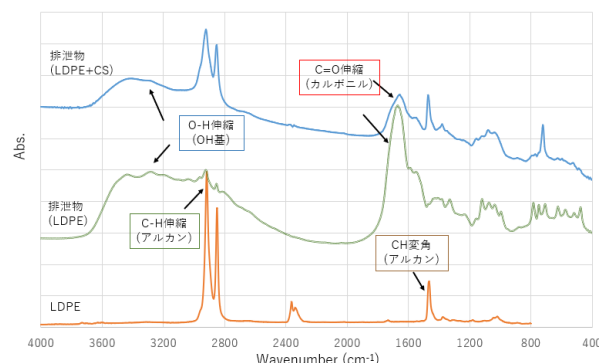


図 6 LDPE と各排泄物の FT-IR スペクトル

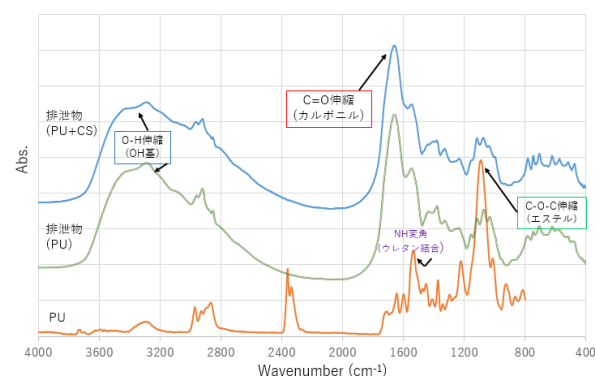


図 7 PU と各排泄物の FT-IR スペクトル

図 7 は吸音ウレタン (PU) とそれを摂食したミールワームの排泄物、およびコーンスターチと混合して PU を与えた際の排泄物の FT-IR スペクトルを示す。PU のスペクトルから特徴的なエステル結合の C-O-C 伸縮振動 ( $1075\text{ cm}^{-1}$  付近) の吸収ピークが確認できる<sup>5)</sup>。一方、排泄物のスペクトルからは PS, LDPE の場合と同様にカルボニル基 ( $\text{C}=\text{O}$  伸縮振動  $1700\text{ cm}^{-1}$  付近) やヒドロキシ基 ( $\text{O}-\text{H}$  伸縮振動  $3300\text{ cm}^{-1}$  付近) 由来の吸収が顕著であり、PU に特徴的な吸収は認められなかった。これより PU がミールワーム体内で消化され、解重合・酸化されていると推測される。続いてコーンスターチを混合して与えた場合の排泄物については、PU のみの排泄物と同様のスペクトルが得られた。これは、コーンスターチと一緒に摂食した場合も PU がミールワーム体内で代謝分解されていることが推測される。PU は PS や PE と比べて分解しやすいことが示唆された。

#### 4. 結言

6 種類のプラスチック製品 (発泡スチロール、吸音ウレタン、レジ袋、フルーツキャップ、緩衝材、PE 粉末) のそれぞれをミールワームに餌として与え、摂食したかを確認した。飼育後一週間の質量差や目視にて観察したところ、発泡スチロール、緩衝材について大きな摂食活動を確認でき吸音ウレタン、フルーツキャップについても摂食が確認できた。プラスチックの形状を走査型電子顕微鏡で観察したところ、形状や形態がミールワームの摂食に影響してお

り、多孔質、薄い板状等、ミールワームが嚙めること重要と推測された。また、プラスチックにミールワームが好むコーンスターチを混合することで、摂食活動が活発になることが確認された。一方でその排泄物を確認したところ、摂食されたプラスチックが代謝分解されず排出した可能性が示唆され、摂食速度が上がると、プラスチックの分解が間に合わないことが示唆された。

## 5. 参考文献

- 1) J. Yang *et al.*, *ENVIRONMENTAL Science & Technology*, **49**, 12080-12086 (2015).
- 2) F. Bertocchini *et al.*, *Current Biology*, **27**, R283–R293 (2017).
- 3) S.-S. Yang *et al.*, *Chemosphere*, **191**, 979-989 (2018).
- 4) 福元豊, 秀島康文, 坂田宗章, 佐賀県工業技術センター平成 6 年度研究報告書, 70-76
- 5) 株式会社東レリサーチセンターホームページ  
[http://cs2.toray.co.jp/news/trc/news\\_rd01.nsf/0/B54017A2B189F13549257D62002C9A26](http://cs2.toray.co.jp/news/trc/news_rd01.nsf/0/B54017A2B189F13549257D62002C9A26)

(2021 年 11 月 1 日受理)